

УДК 621.62.05.01  
Государственный комитет Российской Федерации  
по высшему образованию

Казанский Государственный Энергетический Институт

На правах рукописи

Левапsev Роман Владимирович

**Радиационный теплообмен в топках парогенераторов при  
образовании дисперсных продуктов сгорания**

Специальность 05.14.05 – Теоретические основы теплотехники

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань – 2000

Работа выполнена на кафедре Тепловые электрические станции Казанского Государственного энергетического института.

Научный руководитель:

доктор технических наук,  
профессор Шигапов А.Б.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,  
профессор Панфилов К.Б.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА  
КФУ



0000947892

доктор технических наук,  
профессор Сагадеев В.И.

Ведущее предприятие:

НЦ «Энергопрогресс»  
(г. Казань)

Защита диссертации состоится “*16*” июня 2000 года в *14* часов на заседании диссертационного совета Д063.37.02 в Казанском государственном технологическом университете (зал заседаний Ученого Совета) по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КГТУ

Автореферат разослан “*15 мая*” 2000 года.

Ученый секретарь диссертационного совета Д063.37.02,  
Доктор технических наук, профессор

Лаптев А.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

**Актуальность исследования.** Известно, что подавляющую часть запасов органического топлива представляют ископаемые угли (свыше 90%). В тоже время многие электростанции, которые были спроектированы для работы на твердом и жидком топливе, в настоящее время по известным причинам работают на газе. Наличие запасов угля на складах делают электростанцию на твердом топливе менее подверженной конъюнктурным ситуациям, особенно в зимнее время. Использование углей перспективно в настоящее время и в будущем, для повышения конкурентоспособности необходимо использовать его именно в местах добычи. В настоящее время отсутствуют строгие, физически обоснованные методы расчета теплообмена излучением в топках котлов при сжигании жидких и твердых топлив, имеющих дисперсные продукты сгорания. Поэтому, разработка научно обоснованных методов расчета является задачей актуальной не только в данное время, но и в перспективе.

**Степень изученности проблемы.** В настоящее время для расчета радиационного теплообмена в топках котлов широко используются зональные методы. При этом эффекты рассеяния практически не учитываются, предполагается, что для описания переноса энергии излучения применимы соотношения Бугера-Ламберта. Однако, это уравнение правильно описывает перенос излучения лишь в однофазных средах. Для дисперсных сред закон Бугера-Ламберта не выполняется. Рассеяние света, как известно, является комплексным эффектом отражения, преломления, поглощения света и собственного излучения полифракционных частиц. В результате рассеяния часть энергии перераспределяется в пространстве вокруг частицы, в то же время за счет рассеяния электромагнитного излучения, идущего от других направлений, интенсивность излучения в рассматриваемом направлении возрастает.

Корректный учет эффектов многократного рассеяния и перераспределения излучения в объеме топки возможен лишь при интегро-дифференциальном представлении уравнения переноса энергии излучения (УПЭИ).

В связи с тем, что аналитическое решение интегро-дифференциального УПЭИ в общем виде невозможно, для получения приемлемых результатов чаще всего при его решении используют приближенные численные методы.

Существует численная реализация УПЭИ для различных геометрий: плоской, цилиндрической, сферической. Однако, корректное решение уравнения, применительно к геометрии топки парогенератора, учитывающее реальное (трехмерное) распределение термогазодинамических параметров отсутствует.

**Предметом исследований** является паровой котел тепловой электрической станции, и происходящие в нем процессы: горения топливно-воздушной смеси с учетом подогрева воздуха; радиационный теплообмен с учетом влияния реального распределения состава, температуры, давления, а также электрооптических свойств, концентрации и размеров частиц дисперсной фазы в объеме топки.

Целью исследования является разработка математической модели и методики расчета радиационного переноса в топках котлов ТЭС, разработка алгоритма, программы расчета и проведение численных параметрических исследований влияния различных реальных факторов, имеющих место в топках котлов, на уровень радиационных тепловых потоков.

Научной новизной диссертации является комплексный подход моделирования процессов в топках котлов: горения, движения двухфазных продуктов сгорания в объеме, радиационного теплообмена. Расчет радиационного переноса в топках котлов проводится по разработанному автором методу и программному комплексу применительно к трехмерной геометрии и распределению физических параметров среды. Система уравнений численной реализации метода сферических гармоник в  $P_3$  – приближении для трехмерной геометрии и трехмерного распределения параметров среды. Также представляет новизну и методика проверки правомерности построенной модели расчета, алгоритма и программы расчета.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Методика решения УПЭИ для трехмерной геометрии с учетом трехмерного распределения параметров двухфазной среды. Решение УПЭИ проводится в  $P_1$  – и  $P_3$  приближениях метода сферических гармоник.
2. Алгоритм расчета переноса энергии излучения в дисперсных средах. Для этого построено векторно-матричное представление системы дифференциальных уравнений относительно моментов сферических гармоник. Построен разностный аналог данного уравнения, а также предложен способ решения по выбранной сетке объема.
3. Программный комплекс расчета теплообмена излучением в котлах ТЭС с учетом геометрии топки котла, неравномерного распределения параметров, селективных характеристик излучения и поглощения газовой фазы, реальных оптических свойств, а также плотностей распределения частиц угольной пыли, летучей золы и анизотропии рассеяния.
4. Методика проверки правомерности построенной модели расчета, алгоритма и программы расчета, а также достоверность полученных результатов.
5. Результаты параметрического численного анализа основных определяющих факторов на теплообмен излучением в котельных установках ТЭС.

**Практическая значимость работы:** Результаты исследований программного комплекса могут быть использованы при создании новой техники, модернизации имеющихся конструкций, а также с целью увеличения КПД и ресурса котла, снижения вредных выбросов при переходе котлов с газового на альтернативные виды топлива.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации были доложены на I Республиканском конкурсе студенческих работ на соискание премии им. Н. И. Лобачевского в Казани в 1997 году; I аспиранско-магистерском научном семинаре КФ МЭИ Казань 1997 год; Республиканской научной конференции «Проблемы



энергетики» Казань 1998 год; 2-ом международном симпозиуме по энергетике, окружающей среде и экономике Казань 1998 год; Второй Российской национальной конференции по теплообмену Москва 1998 год; XII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева Москва 1999 год. Одна статья находится в редакции, также основные моменты диссертации опубликованы в 4 тезисах и 3 докладах.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 136 наименований. Работа содержит 96 страниц текста, 24 рисунка.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** подчеркнута актуальность исследования, выявлена степень изученности проблемы, определена цель работы, охарактеризована ее научная новизна.

**В первой главе «Теоретические основы переноса энергии излучения в топках котлов»** дается понятие интенсивности излучения, приведен вывод уравнения переноса энергии излучения (УПЭИ) для трехмерной геометрии тонки котла имеющий следующий вид:

$$\begin{aligned} \sin \theta \cos \psi \frac{\partial I_{\lambda}(x, \psi, \theta)}{\partial x} + \sin \theta \sin \psi \frac{\partial I_{\lambda}(x, \psi, \theta)}{\partial y} + \cos \theta \frac{\partial I_{\lambda}(x, \psi, \theta)}{\partial z} + \Sigma I_{\lambda} = \\ = \frac{\Sigma_s}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \sin \theta' I_{\lambda}(x, \psi', \theta') \gamma(\mu_0) d\theta' + \Sigma_a I_{b\lambda}(T_x), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Sigma$ ,  $\Sigma_a$ ,  $\Sigma_s$  - коэффициенты ослабления, поглощения и рассеяния дисперсных топочных газов;  $\gamma(\mu_0)$  - индикатриса рассеяния полидисперсных частиц;  $\bar{\Omega}$ ,  $\bar{\Omega}'$  - векторы телесного угла в рассматриваемом и произвольном направлениях;  $x$  - радиус-вектор точки пространства;  $\psi$ ,  $\theta$  - азимутальная и полярная компоненты телесного угла.

$$\bar{\Omega} \cdot \bar{\Omega}' = \mu_0 = \cos \theta \cos \theta' + \sin \theta \sin \theta' \cos(\psi - \psi')$$

Уравнение (1), будучи дифференциальным по пространственной переменной, требует задания граничных условий:

$$I_{\lambda}(x) \Big|_r = \varepsilon_{\lambda cm} \cdot I_{b\lambda}(T_{cm}) + (r_{\lambda cm} \cdot q_{p\lambda}) / \pi; \quad q_{p\lambda}(x) = \int_{2\pi} I_{\lambda}(x, \Omega) \Omega n d\Omega. \quad (2)$$

$n\Omega < 0$ , где  $\varepsilon_{\lambda cm}$ ,  $r_{\lambda cm}$  - диффузный коэффициент спектральной излучательной способности и коэффициент отражения стенки,  $n$  - нормаль поверхности стенки. Условие  $n\Omega \leq 0$  в случае плоской границы соответствует внутренней к объему тонки поверхности. Используя то обстоятельство, что в уравнении переноса (1) одним из аргументов является единичный радиус-вектор  $\bar{\Omega}$ , решение уравнения (1) ищем в виде разложения в ряд по сферическим функциям (сферическим гармоникам)

$$I_{\lambda}(x, \mu, \psi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n \frac{2n+1}{2\pi(1+\delta_{m0})} \cdot \frac{(n-|m|)!}{(n+|m|)!} \varphi_{nm}(x) Y_n^{(m)}(\mu, \psi), \quad (3)$$

где  $\varphi_{nm}$  — коэффициенты разложения при сферических гармониках, называемые моментами сферических функций:

$$\varphi_{n\pm m}(x) = \int_0^{2\pi} d\psi \int_{-1}^1 d\mu I_{\lambda}(x, \mu, \psi) Y_n^{(\pm m)}; \quad (4)$$

Умножим (1) на  $P_n^{(m)}(\mu)(\cos m\psi + \sin m\psi)$  и проинтегрируем по всем направлениям. Для удобства преобразовываем каждый член полученного уравнения по отдельности. В результате получаем бесконечную систему дифференциальных уравнений в частных производных. При ограничении порядка  $n$  данной системы получаем системы уравнений для  $P_n$  — приближения МСГ. Разложению (3) должны быть подвергнуты и граничные условия (2). Используя известное соотношение:  $d\Omega = \sin \theta d\theta d\psi$ , можно найти граничные условия для различных направлений нормали,  $\overline{n\Omega} = \sin \theta \cos \psi$ ,  $\overline{n\Omega} = \cos \theta$ ,  $\overline{n\Omega} = \sin \theta \sin \psi$ . В диссертации приводятся системы уравнений для  $P_1$  и  $P_3$  — приближений метода сферических гармоник, даны векторно-матричные представления этих систем уравнений, а также дано решение систем методом сеток. Система уравнений  $P_3$  — приближения МСГ представляет матрицу коэффициентов разложения  $\varphi_{n\pm m}$  размерностью  $16 \times 16$ .  $P_1$  — приближение —  $4 \times 4$ .

Во второй главе «Радиационные свойства двухфазной среды» рассматриваются коэффициенты ослабления, рассеяния, индикатриса рассеяния полидисперсной системы частиц. Представлено краткое изложение теории рассеяния Ми. Представлен анализ плотностей вероятностей распределения частиц по размерам и сделан обоснованный выбор вида  $f(r)$ .

В виду необходимости преобразования интегрального члена УПЭИ (1) индикатриса рассеяния также представлена в виде разложения по полиномам Лежандра.

С использованием распределения Розина-Рамлера и логарифмического распределения были рассчитаны радиационные свойства угольной пыли и золы топочных газов. Значения оптических констант веществ принимались по рекомендациям работы А.Г. Блоха.

Третья глава «Горение частиц угольной пыли». Для корректного определения радиационных тепловых потоков к стенкам парогенерирующих труб необходимо располагать достоверной информацией о распределении термогазодинамических параметров (давления, температуры, плотности, молекулярного состава, размеров и концентрации частиц дисперсной фазы) в объеме топочного пространства. Эти данные могут быть получены при совместном рассмотрении процессов горения, аэродинамики движения топочных

газов в топке и теплообмена между топочными газами и стенками парогенерирующих труб. Совместное рассмотрение этих процессов на современном уровне вычислительной техники вряд ли осуществимо, поэтому столь сложную задачу целесообразно решать по этапам, методом последовательных приближений. В работе было рассчитано горение частиц угольной пыли в объеме топки котла.

Интегральные характеристики процессов горения пылеугольных частиц определялись по «методу определяющих реакций» и учитывались лишь образование полных продуктов окисления горючих элементов  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ . Для теплотехнических расчетов данная методика вполне оправдана, поскольку влиянием на радиационный теплообмен неполных продуктов реакции, образующихся при горении, можно пренебречь ввиду их относительно малой концентрации.

Распределение температуры в объеме топки и степени выгорания топлива (выжига) принимались обобщением результатов для различных типов котлов. Принимались также ряд допущений при расчете выгорания частиц угольной пыли: о воспламенении топливовоздушной смеси; о сгорании летучих, а также допущения о том, что все элементы топлива обладают одинаковой реакционной способностью. Следствием данного допущения является пропорциональное выгорание всех компонентов и химических элементов топлива.

Распределение частиц угольной пыли на входе в топку задавалось в виде зависимости Розина-Рамлера. Данное непрерывное распределение частиц топлива затем представлялось в виде набора дискретных, квазимонодисперсных частиц, имеющих постоянные размеры.

В начальном участке факела оценивалась количество возможного осаждения крупных частиц пыли в области холодной воронки котла. Эти расчеты были выполнены в предположении сферической формы частиц угольной пыли, а также без учета неизотермичности среды и возможного влияния на коэффициент аэродинамического сопротивления горения частиц и тепло-массообменных процессов. Относительная скорость (скорость витания) частиц рассчитывалась для сечения топки на уровне горелок. Как показывают расчеты скорость витания частиц угольной пыли всех фракций топлива существенно меньше средней скорости движения среды, состоящей из топливно-воздушной смеси и частично сгоревших продуктов сгорания. Реальные аэродинамические процессы в топке сопровождаются возникновением обратных течений и рециркуляцией части высокотемпературных продуктов сгорания в зону подачи топливовоздушной смеси. Этим объясняется захват части несгоревшего топлива в область холодной воронки, с последующим его осаждением на стенках, что является причиной потерь из-за недожога при осаждении частиц угольной пыли. Горение частиц угольной пыли в топках парогенератора рассчитывалась по модели приведенной пленки. При этом влияние паров воды на поверхностные реакции не учитывались. Следующим является допущение одномерного распределения параметров топоч-

ных газов по высоте топки. Представленная методика и алгоритм были реализованы в программном пакете расчета горения угольной пыли на алгоритмическом языке FORTRAN.

Расчеты показали, что горение частиц всех фракций угольной пыли происходит в основном в кинетической области. На высоте 0,7 м вертикального участка факела угольная пыль сгорает полностью. Это позволяет в расчетах радиационного переноса в подавляющей части объема учитывать лишь влияние летучей золы в составе топочных газов.

В четвертой главе «Результаты численных исследований переноса излучения» описан программный комплекс (ПК) расчета переноса энергии излучения.

Алгоритм вычислений в ПК следующий. Для длины волны излучения  $\lambda_0$  определяем оптические константы угля и золы, радиационные характеристики дисперсной фазы, а также коэффициенты разложения индикатрисы рассеяния. Затем для заданной высоты топки определяем термогазодинамические параметры (температуру, давление, выжиг топлива, коэффициент поглощения газа и т.д.). Данная процедура выполняется для ряда значений координат по высоте топочного объема. Далее, изменяя длину волны излучения в соответствии с выбранным шагом  $\Delta\lambda$ , повторяем расчеты для объема топки котла.

На каждом шаге по  $\lambda$  происходит решение переноса излучения методом сферических гармоник, расчет плотности спектральных радиационных тепловых потоков, их суммирование, накопление значений интегральных тепловых потоков.

Наиболее обобщенные научные результаты могут быть получены при параметрических исследованиях влияния различных факторов на уровень радиационных тепловых потоков, таких как геометрические размеры топки, распределение температуры в объеме, распределение концентрации и изменение размеров частиц дисперсной фазы в топке, а также, распределение перечисленных факторов в пределах относительно холодного пристенного слоя. Результаты таких параметрических исследований от перечисленных факторов представлены в данной главе.

На рисунке графика 1 показано изменение концентрации частиц золы по высоте топки котла. В виду того, что количество уносимой золы является постоянной по высоте, ее концентрация однозначно определяется плотностью топочных газов. С увеличением плотности газов, концентрация частиц золы  $N_z$  растет. Плотность газовой фазы зависит от совместного влияния давления, температуры и состава топочных газов. В пределах принятого допущения о равномерном выгорании всех элементов топлива определяющим влиянием на характер изменения концентрации являются давление и температура. Поскольку уменьшение давления по высоте топки не превышает 1,5%, главным фактором выступает температура топочных газов. Поэтому концентрация представляет зер-

кальное отображение температурной зависимости, где правда точка минимума концентрации не совпадает с точкой максимума температуры, что является следствием влияния давления и состава топочных газов.

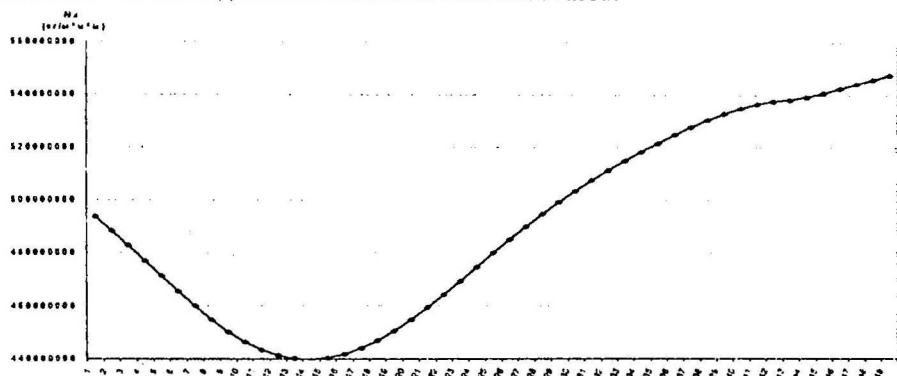


Рис.1. Распределение концентрации по высоте.

Спектральные радиационные свойства  $\Sigma$ ,  $\Sigma_s$  по высоте при  $\lambda=0,25$ ; 5; 10 мкм представлены на рис.2. Для всех значений длин волн  $\lambda$  наблюдается одинаковый ход изменения спектральных свойств, схожий с изменением концентрации частиц золы, следовательно, можно сделать вывод о преобладающем влиянии на коэффициенты ослабления и рассеяния концентрации частиц золы. Коэффициент ослабления по всей высоте топки с увеличением  $\lambda$  растет. По графикам заметен рост  $\Sigma$  в интервале  $\lambda=0,25 - 5$  мкм и в меньшей мере при увеличении  $\lambda$  от 5,0 до 10 мкм. Коэффициенты рассеяния также изменяются по высоте топки монотонно. Однако с ростом длин волн излучения  $\Sigma_s$  резко снижается в диапазоне  $\lambda=0,25 \div 5$  мкм, в дальнейшем заметен рост коэффициента рассеяния частиц золы.

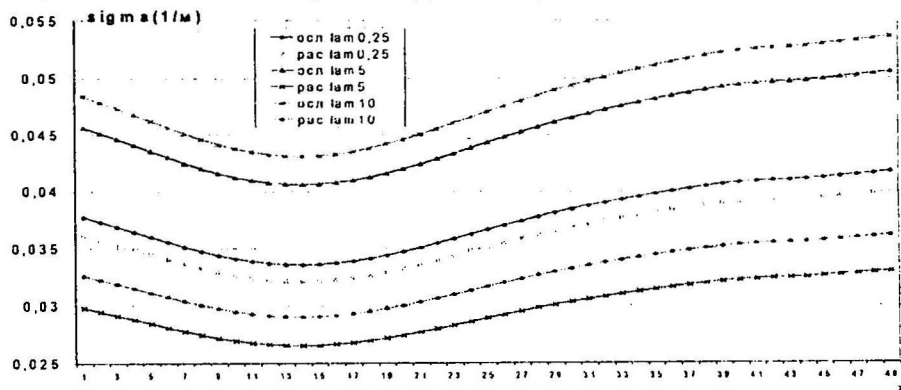


Рис.2. Коэффициенты ослабления и рассеяния для частиц золы

Если изменение параметров потока в параллельных горизонтальных плоскостях топки является равномерным, (происходит изменение температур только по координате  $z$ ), то наблюдается относительно равномерное распределение теплового потока по высоте топки. Максимальное значение  $q_p$  составляет, при относительной координате  $z=15$ , приблизительно  $160 \text{ кВт/м}^2$ , минимальное - в районе газохода, приблизительно  $130 \text{ кВт/м}^2$ . В дальнейшем для сравнений такой поток назовем «средним потоком»,  $q_{cp}$  на рис.3. Увеличение концентрации частиц золы и угольной пыли по поперечному сечению топки у стенок ( $q_r(Nz) 1,5; 1,9$  на рис.3) приводит к снижению радиационного теплового потока, причем с увеличением концентрации у стенок уровень  $q_p$  падает сильнее. Это вызвано с ростом эффектов рассеяния излучения частицами дисперсной фазы.

В расчетах принималось линейное изменение концентрации дисперсной фазы  $Nz$  по поперечному сечению топки. В центре условно принята концентрация 0,1 или 0,5, у стенок 1,9 и 1,5 соответственно. Эти распределения соответствуют постоянной концентрации дисперсной фазы в потоке топочных газов. Перераспределение концентрации дисперсной фазы на практике может быть реализовано для случая тангенциальной подачи топлива, т.е. закрутки потока. Эти графики отражают лишь влияние перераспределения концентрации в чистом виде. Отметим также, что при исследованиях распределения концентрации принималось независимым от высоты топки.

Вихреобразное движение топочных газов может привести также к перераспределению размеров частиц в поперечном сечении. Более крупные частицы будут сконцентрированы у стенок, а мелкие – в центре топки. Влияния данного фактора моделировалось изменением оптических размеров (оптического радиуса) частиц по ослаблению и рассеянию. Средний радиус частиц принимался равным  $3,35 \text{ мкм}$ , который при плотности вероятности распределения частиц по размерам  $f(r)$  летучей золы соответствует среднему значению  $r_{cp}$  по ослаблению и рассеянию. Изменение размеров  $r_{cp}$  выбиралось линейным, при этом параметры  $f(r)$  в центре потока соответствуют среднему радиусу  $1,35 \text{ мкм}$ , у стенки –  $5,35 \text{ мкм}$ .

Влияние перераспределения приводит к существенному (приблизительно в 1,5 раза) увеличению теплового потока в топке. На рис.3 значения  $q_p$  этих расчетов обозначены  $q_r(f(r))$ .

В нижней части топки тепловой поток, при этом снижается относительно «среднего» приблизительно в 1,2 раза, при относительной координате  $z$  больше 9 тепловой поток больше «среднего потока». Максимальное отличие наблюдается в зоне горения, которое составляет приблизительно в 1,5 раза. Увеличение  $q_p$  при росте концентрации крупных частиц у стенки объясняется тем, что с увеличением размеров частиц доля рассеянного вперед излучения возрастает. Снижение  $q_p$  в нижней части топки вызвано коллективным эффектом экранирования излучения

частицами из-за рассеяния, а также относительно невысокой температуры топочных газов в зоне горелочных устройств.

Совместное влияние концентрации и  $f(r)$  ( $q_r(fr, Nz=1,9)$  на рис.3) приводит к более существенному изменению профиля теплового потока в топке. Совместное влияние приводит к увеличению  $q_r$  до относительной координаты 20. В дальнейшем наблюдается снижение теплового потока, и можно заметить, что влияние этих двух противоположных факторов приводит к тому, что в области верхних радиационных экранов  $z > 39$  тепловой поток приблизительно равен «среднему потоку».

При движении топочных газов около стенки формируется динамический пограничный слой, который образуется от места окончания активных химических реакций (зоны горения топлива). За счет вязкости, а также влияния теплопроводности и конвективного теплообмена толщина данного пограничного слоя растет, образуется пристенная зона относительно низкой температуры. Распределение температуры в пределах данного пристенного слоя, а также ее толщина, определяется в результате аэродинамических расчетов движения топочных газов.

В численных исследованиях толщина данного пристенного слоя нами принята постоянной и равной 0,7 м. Распределение температуры в пределах пристенного слоя принималось линейным от значения температуры в ядре потока до температуры стенки. Влияние данного фактора приводит к существенному (в 2 раза) снижению  $q_r$ . Результаты данной серии расчетов обозначены  $q_r(I)$  на рис.3.

Коллективное влияние распределения температуры в пристенном слое и распределения концентрации приводит к более сильному падению тепловых потоков (для примера, увеличение концентрации в 2 раза - снижает  $q_r$  на  $\approx 40\%$ ), см. графики  $q_r(I, Nz=1,5; 1,9)$  на рис.3. Рассматривалось также парное влияние распределения температуры и размеров частиц. Как показывают эти расчеты, при этом происходит существенное уменьшение радиационного теплового потока (РТП) обозначенных  $q_r(fr, T)$  на рис.3. Это приводит также к качественному перераспределению теплового потока по высоте топки. Например, происходит снижение  $q_r$  в нижней части топки в 5 раз, в то время как снижение  $q_r$  в верхней части топки составляет  $\approx 50\%$  от «среднего». Комплексное влияние всех перечисленных факторов приводит к еще более существенному снижению РТП. При этом не компенсируется относительный рост за счет изменения размеров и концентрации частиц ( $q_r(все)$  на рисунке 3). Нужно отметить, что снижение тепловых потоков по высоте (при  $z > 18$ ) не существенно, следовательно, тепловой поток не определяется однозначно местной температурой топочных газов. Это является следствием сложного перераспределения излучения в пространстве топки из-за многократного рассеяния.

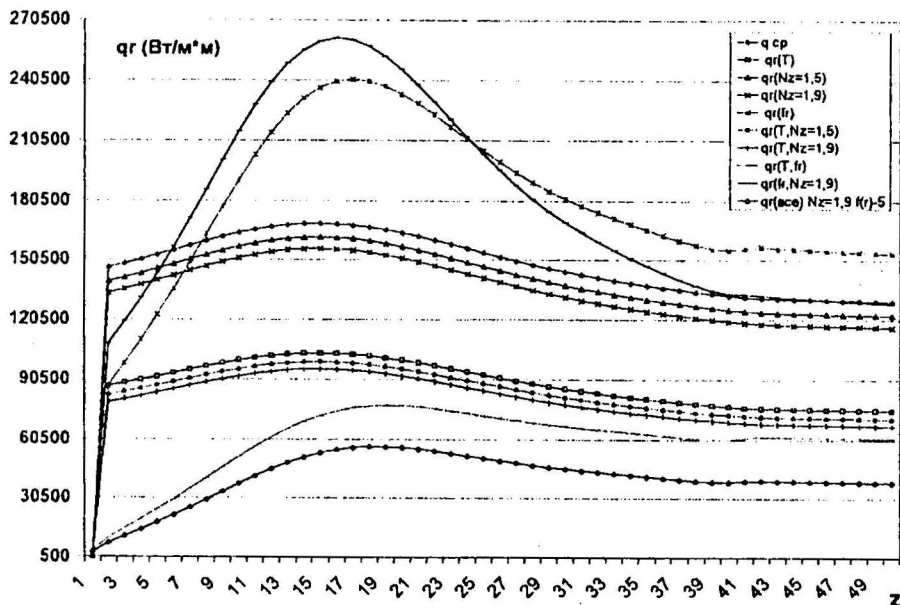


Рис.3. Зависимость теплового потока от различных параметров.

Для ряда котлов наблюдается прогорание парогенерирующих труб, расположенных в угловых зонах топки. Особенно часто данное нарушение наблюдается при переходе с газообразного на твердые или жидкие виды топлива, то есть, при образовании дисперсных продуктов сгорания. Поэтому особое внимание было уделено расчету радиационных тепловых потоков для угловых зон топки котла. Результаты численных исследований  $q_r$  в угловых зонах представлены на рисунке 4. Влияние отдельных факторов отмечены аналогично обозначениям предыдущей серии исследований, представленных на рисунке 3. В угловых точках наблюдается совместное влияние пристенного слоя смежных плоскостей. Это влияние приводит к дополнительному снижению тепловых потоков. Формирование пристенной зоны топочных газов в угловых зонах топочного объема имеют свои особенности. При организации вращательной подачи топливовоздушной смеси в зону горения в угловых областях топки образуется сложное циркуляционное течение. В виду ограниченной зоны соприкосновения с основным потоком и интенсивного теплоотвода в стенки парогенерирующих труб, естественно предположить, что температура газов в данной циркуляционной зоне ниже температуры основного потока. Это приводит к дополнительному снижению радиационных тепловых потоков к стенкам в угловых зонах топочного пространства. Неравномерность обогрева парогенериру-



ющих труб является причиной снижения движущего напора циркуляции в крайних трубах, нарушения теплообменных процессов в них и последующего разрушения.

Особенности движения газов и радиационного переноса в угловых зонах смежных стенок топки могут быть учтены при разработке метода расчета аэродинамики продуктов сгорания. В виду отсутствия надежных методов аэродинамических расчетов и результатов необходимых исследований влияния циркуляционной зоны на радиационный перенос не учитывались.

Для угловых зон влияние рассмотренных выше факторов на РТП имеют аналогичный для основных областей теплообменных поверхностей характер. Влияние отдельных факторов, а также различного сочетания факторов проявляется в более сильной форме. Например, распределение температуры и концентрации дисперсной фазы в пристенной области снижают  $q_p$ . Совместное влияние температуры и размеров более существенно, а комплексное влияние всех эффектов проявляется более сильно.

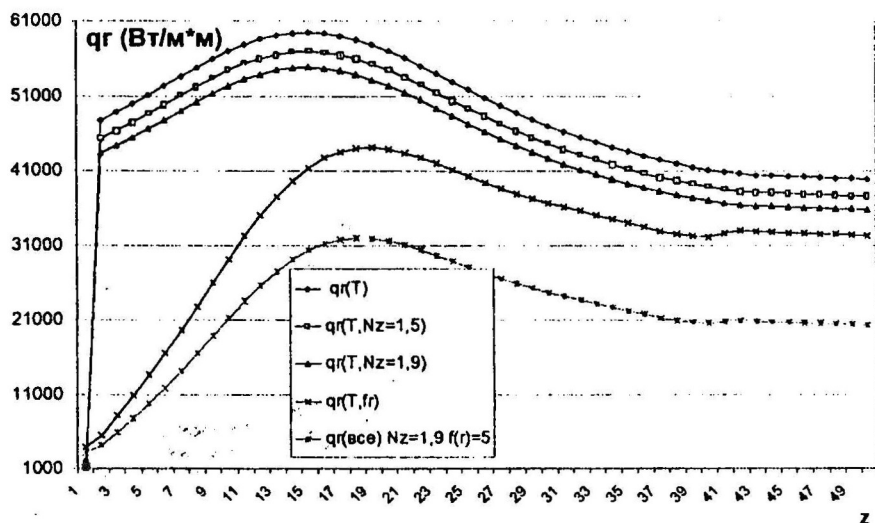


Рис. 4. Тепловой поток в угловых зонах от различных параметров.

Особое место в численных методах занимают вопросы о сходимости расчетной схемы, корректности работы программы и точности и достоверности полученных результатов.

Сходимость расчетной схемы проводят при вариации параметров, например, обычно при вариации шага интегрирования. Если при этом точность при принятом шаге сетки и двойном его увеличении одинакова и результаты совпадают или отличаются на допустимую величину, то результаты считаются

корректными и алгоритм расчета правильными. Поэтому были проведены расчетные исследования при следующих выбранных шагах сетки равных 0,6 и 0,3 м. При этом результаты  $q_p$  практически совпадали, погрешность расчета РТП не превышает 0,6%, рис.5.

Также были проведены исследования точности расчетов  $q_p$  при варьировании шага по спектру излучения. Выбирались шаги по спектру излучения  $d\lambda$  равные 1; 0,5; 0,25 и 0,1 мкм (рис.6). Следует заметить, что при уменьшении шага по длине волны от 1 до 0,1 мкм значительно увеличивается машинное время для решения задачи.

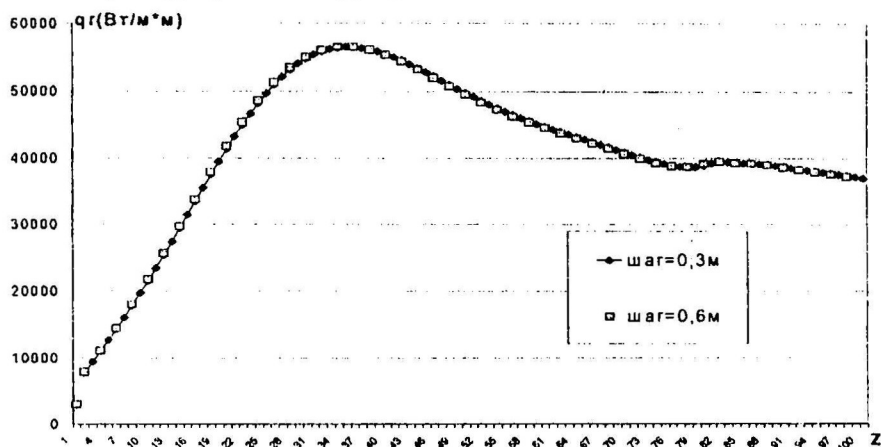


Рис.5. Зависимости теплового потока от шага сетки.

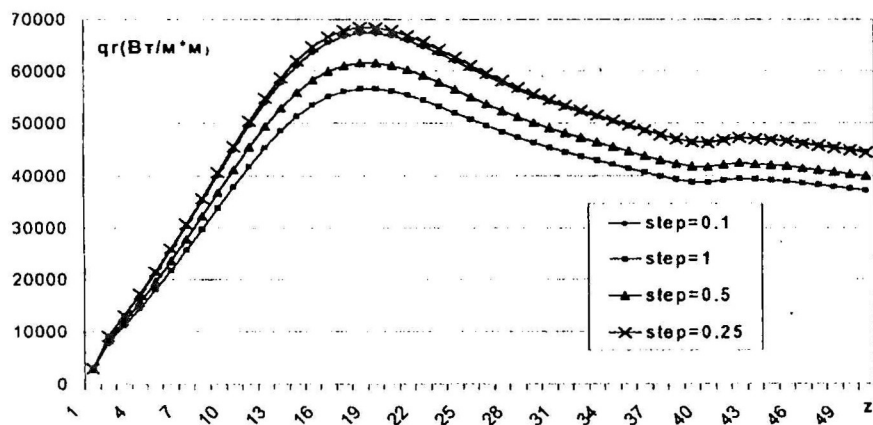


Рис.6. Зависимость теплового потока от шага интегрирования

По графикам рисунка 6 можно заметить, что при уменьшении шага  $\Delta\lambda$  приводит к некоторому росту значений  $q_p$ , который составляет для  $\Delta\lambda = 1$  мкм  $\approx 16\%$ , для 0,5 мкм – 9% в максимальном значении. Однако повышение точности вариации шага от 0,25 до 0,1 мкм, заметного изменения величины  $q_p$  не наблюдается. Следовательно, для практических расчетов можно ограничиться шагом интегрирования равным 0,25 мкм.

Корректность полученных данных обычно оценивают сравнением с результатами расчетов, полученными более точными методами или с результатами экспериментов. Однако, погрешности, полученные в результате экспериментов, как правило, значительно большие по сравнению с погрешностями численных методов. Измерение плотности радиационных тепловых потоков проводятся с некоторыми методическими и приборными недостатками. Измерить плотность РТП не представляется возможным, поэтому на практике удастся замерить лишь часть потока  $q_p$  – интенсивность излучения.

Разработка надежных способов проверки достоверности полученных результатов представляет собой важную научную и практическую задачу. Для проверки правильности результатов предлагается простой способ, на который не обращали внимание.

Известно, что замкнутый изотермический объем с постоянной температурой среды равной температуре стенок представляет модель абсолютно черного тела. Поэтому, для такого объема рассчитанное значение поверхностной плотности теплового излучения должно быть равным значению  $q_p$ , определяемому для абсолютно черного тела в соответствии с законом Стефана-Больцмана

$$q_h = \sigma_0 \cdot T^4,$$

где  $\sigma_0 = 5,668 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>.

Были проведены расчеты РТП для изотермической среды топки котла равной 1000 К, и температуре стенки равной температуре среды. Расчетное значение РТП получилось равным  $q_p = 56553,64$  Вт/м<sup>2</sup> по всей высоте топки котла. Рассчитанное значение  $q_p$  по соотношению Стефана-Больцмана равно  $q_p = 56680$  Вт/м<sup>2</sup>. Полученную точность необходимо признать высокой. Некоторая часть полученной погрешности вызвана также ограничением верхнего предела интегрирования  $\lambda$  равной 20 мкм. Следовательно, можно утверждать, что точность разработанного метода расчета значительно превышает потребности теплоэнергетики. Поэтому, можно сделать вывод, что расчетная модель, алгоритм и программа расчета функционируют правильно и результаты исследований следует считать достоверными и корректными.

#### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ:

- Разработана методика решения УПЭИ для трехмерной геометрии с учетом трехмерного распределения параметров двухфазной среды;
- Используя разработанный метод построен алгоритм расчета переноса энергии излучения в дисперсных средах. Для этого построено векторно-матричное

представление системы дифференциальных уравнений;

- Построен разностный аналог данного уравнения, а также предложен способ решения по выбранной сетке объема;
- Разработан программный комплекс расчета теплообмена излучением в котлах ТЭС с учетом геометрии топки котла, неравномерного распределения параметров, селективных характеристик излучения и поглощения газовой фазы, реальных оптических свойств, а также плотностей распределения частиц угольной пыли, летучей золы и анизотропии рассеяния;
- Правомерность построенной модели расчета, алгоритма и программы расчета, а также достоверность полученных результатов проведена специальными расчетами по разработанной методике;
- Проведен параметрический численный анализ основных определяющих факторов на теплообмен излучением в котельных установках ТЭС;

Результаты исследований программного комплекса могут быть использованы при создании новой техники, модернизации имеющихся конструкций и при переходе котлов с газового на альтернативные виды топлива.

**Основные положения диссертации изложены в следующих публикациях:**

1. Левашев Р.В. Перенос энергии излучения в дисперсных средах для прямоугольной геометрии (геометрии котла). Республиканский конкурс студенческих работ на соискание премии им. Н. И. Лобачевского. Тезисы конкурсных работ /сост. Бикеев И.И./ - Казань: Новое Знание, 1997, стр. 108-109.
2. Левашев Р.В., Шигапов А.Б. Преобразование кинетического уравнения переноса энергии излучения в приближении метода сферических гармоник для геометрий котлов ТЭС. Материалы докладов I аспиранско - магистерского научного семинара КФ МЭИ. - Казань: КФ МЭИ 1997, стр. 24-25.
3. Шигапов А.Б., Шагеев М.Ф., Левашев Р.В. Влияние реальных характеристик в объеме топке котла на радиационный перенос. Материалы докладов республиканской научной конференции «Проблемы энергетики». В 4-х частях, часть 1. - Казань: Труды КФ МЭИ 1998, стр. 13-14.
4. Шигапов А.Б., Левашев Р.В., Шагеев М.Ф. Решение уравнения переноса энергии излучения методом сферических гармоник для трехмерной геометрии. Материалы докладов республиканской научной конференции «Проблемы энергетики». В 4-х частях, часть 1. - Казань: Труды КФ МЭИ 1998, стр. 14-15.
5. Шигапов А.Б., Шагеев М.Ф., Левашев Р.В. Радиационный теплообмен в топках котлов при сжигании природного газа. Материалы докладов 2-го международного симпозиума по энергетике, окружающей среде и экономике. В двух томах. Т.1. Казань: КФ МЭИ (ТУ). 1998, стр. 56-59.
6. Шигапов А.Б., Левашев Р.В., Шагеев М.Ф. Теплообмен излучением в топках парогенератора ТЭС. Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.1. Пленарные и общие проблемные доклады. Доклады на круглых столах. М.: Издательство МЭИ, 1998, стр. 111-114.
7. Левашев Р.В., Шигапов А.Б. Теплообмен излучением в котлах ТЭС в  $P_1$  - приближении метода сферических гармоник. Труды XII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. -М.: Издательство МЭИ, 1999, стр. 302-304.

Соискатель

*Левашев Р.В.*

Левашев Р.В.

Подписано к печати 28.04.2000г.

Формат 60×84 1/16

Печать

• РОМ

Исч.л. 1,0

Усл.печ.л. 0,93

Уч.-изд.л. 1,0

Тираж 100 экз.

Заказ 443